Op het tiende symposium van de Historische Kring Reken- en Wiskunde Onderwijs (HKRWO) 'Van Oude maten en het Nieuwe meten' hield **Edu Wijdeveld** een voordracht over Marcel Minnaert.
'Er dient een directe relatie gelegd te worden tussen het vakonderwijs en het dagelijkse leven', zei Minnaert. In 1923.....

'Heb de natuur lief'

Inleiding

In de inleiding van *De natuurkunde van 't vrije veld*; deel 1: *Licht en kleur in het landschap,* zegt prof. Minnaert:

> 'Wie houdt van de natuur neemt haar verschijnselen waar zoals hij ademt en leeft: uit een aangeboren, diepe drang. Zonneschijn en regen, warmte en koude zijn hem even welkome gelegenheden tot opmerken, hij vindt zijn gading in de stad en in het bos, in de zandvlakte en op de zee. Ieder ogenblik wordt hij getroffen door nieuwe en belangwekkende gebeurtenissen. Met veerkrachtige stap zwerft hij over de wijde landen, oog en oor klaar tot het opnemen van indrukken die van alle kanten op hem aankomen, diep inademend de geur der lucht, voelend elk temperatuurverschil, met de hand soms strelend een struik langs de weg, om in nauwere aanraking te zijn met de dingen der Aarde. Zo voelt hij zich een mens in levensvolheid (…).'

Spreekt hier de romanticus, de poëet, die zich 'in levensvolheid' welhaast identificeert met de natuur, om ons haar volle schoonheid en harmonie te tonen?
Zeker, maar daarnaast ook de gedreven wetenschapper en leraar, die ons achter die betoverende schoonheid ook de rationele verklaring wil voorhouden, omdat, zoals hij zelf zegt:

> 'De natuurkunde van het vrije veld een verrijking is van het concrete, omdat bewustwording en begrip, aan het waargenomene een dimensie toevoegen.'



fig. 1 Het Minnaertgebouw

Is daarmee de drijfveer en het karakter getekend van prof. Marcel Minnaert, universeel geleerde en astronoom van wereldfaam, die door de Universiteit Utrecht zelfs geëerd werd met een 'eigen' gebouw, gedragen door de letters van zijn naam?

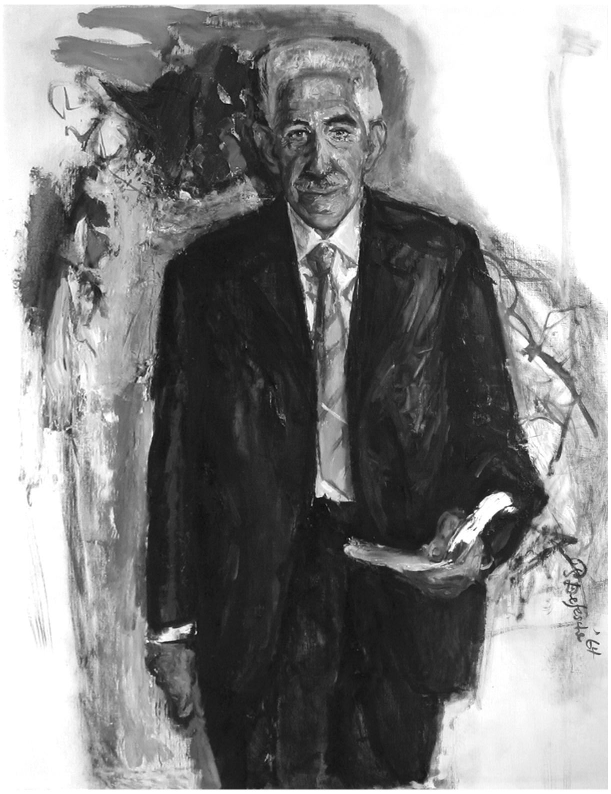


fig. 2 Marcel Minnaert door P. Defesche

De fascinerende biografie over Minnaert van de hand van Leo Molenaar, De rok van het universum – een verwijzing naar een gedicht van Lucebert – tracht daar een antwoord op te geven.
Die fascinatie – *mijn* fascinatie – plus het feit dat ik in mijn voorkandidaatsopleiding Minnaert persoonlijk mocht ontmoeten, moge er de rechtvaardiging voor zijn, dat *ik* [*Edu Wijdeveld - Red.*] nu voor u sta en niet Leo Molenaar, die vandaag helaas verhinderd was hier aanwezig te zijn.

Daarbij valt mijn voordracht in twee delen uiteen, die indachtig het thema van deze bijeenkomst, respectievelijk te benoemen zijn met ‘Meet Minnaert’ en ‘Minnaert meet’, waarbij u het eerste ‘Meet’ overigens wel op z’n Engels dient uit te spreken …

Meet Minnaert

Aan de hand van een schitterend getroffen portret van Pieter Defesche, dat ook in voornoemd gebouw hangt, schets ik u eerst het beeld van de Minnaert zoals ik die in 1950 leerde kennen in de kleine collegezaal en bibliotheek van de sfeervolle sterrenwacht ‘Sonnenborg’ in Utrecht. Een rijzige, beminnelijke man, met indrukwekkend borstelhaar en dito snor, die op gedreven en ernstige wijze kon lesgeven over ‘zijn’ hemel en aarde, ‘zijn’ zon en sterren. Een zeer menselijk figuur, met open oog en oor voor iedereen, die ook nooit zou verzuimen de avond-practica van – alweer – ‘zijn’ studenten met een belangstellend bezoek te vereren.

Laat ik u een anekdote vertellen over dat menselijk karakter van prof. Minnaert. Het college ging over de indeling van sterren naar kleur en temperatuur. Van origine werd die indeling aangeduid met respectievelijk de hoofdletters A, B, C, enzovoort. Maar door vernieuwde inzichten en hergroepering in de loop der tijd, was die lettervolgorde danig door elkaar geraakt. En nooit zal ik de wijze vergeten waarop prof. Minnaert ons leerde die (huidige) volgorde te onthouden. Met een wat verlegen lach op het gezicht keerde hij zich tot ons en sprak de onvergetelijke woorden: ‘Oh Be A Fine Girl, Kiss Me Right Now’, waarvan de beginletters O,B,A,F,G,K,M,R,N die bewuste volgorde aangeven.
Zeker, Minnaert was voor mij een van die voorbeeldleraren die je je leven lang bijblijven. Helaas duurde mijn astronomische carrière maar kort, omdat mijn tentamen tot mijn – en zijn – teleurstelling, eindigde in een mager zeventje.
En dan verschijnt daar die biografie van Molenaar, waaruit tot mijn verrassing een totaal andere Minnaert tevoorschijn komt dan in mijn geheugen gegrift stond. Bij eerste lezing wel te verstaan, want bij nadere studie en doordenking kwamen de touwtjes langzamerhand toch weer aardig bij elkaar.
En als u zich realiseert dat die biografie een omvang heeft van 600 pagina’s, dan zult u begrijpen hoezeer ik mij in dit korte tijdsbestek moet beperken om toch enigszins een beeld te schetsen van de fascinerende persoonlijkheid die uit die pagina’s oprijst: onderzoeker, wetenschapper, leraar en didacticus, alsook dichter en romanticus. Maar evenzeer rationalist en eigenzinnig individualist, die vanuit een verheven ideologie, strijdbaar en onverzoenlijk, zijn gelijk kon opeisen, daarbij soms de realiteit uit het oog verliezend.

Die persoonlijke ideologie, een soort sociaal-politieke variant van Darwins ‘struggle for life’, waarin kernbegrippen als specialisatie, differentiatie en met name: wederkerig dienstbetoon de hoofdrol spelen, kon hem in zijn leven verzoenen met beide uiteinden van het politieke spectrum: in zijn jongere jaren als radicaal flamingant, die er in 1915 niet voor terugdeinsde de Duitse bezettingsmacht in te schakelen voor zijn ideaal van een vrij en onafhankelijk Vlaanderen; op oudere leeftijd daarentegen, als overtuigd humanist, passivist en ideëel communist, in zijn gerichtheid op verheffing der mensheid en bevordering van de wereldvrede.

Ik geef u een korte schets van de feiten
Marcel Minnaert wordt op 12 februari 1893 in Brugge geboren en groeit op in een zeer beschermd ouderlijk milieu. Vader Jozef laat er in zijn dagboeken geen misverstand over bestaan dat zijn zoon moet opgroeien tot een moreel hoogstaande natuurwetenschapper. Voortdurend wordt hij gestimuleerd vragen te stellen, te experimenteren, te onderzoeken, te verklaren. Dat laat de begaafde jongeling zich graag aanleunen en hij verslindt daarbij een boekenkast vol uiteenlopende titels: van *Robinson Crusoë* tot *Het boek van Tom Tit*, vol schitterende natuurkundeproeven, van de *Dictionaire Larousse* tot en met de *Geschiedenis van België*. En zelfs na zijn vroege dood in 1903 laat vader Jozef zijn gezag over de jonge Marcel nog gelden als hij hem een afscheidsbrief nalaat vol aanbevelingen en geboden, waaronder het in de titel van deze voordracht geciteerde ‘Heb de natuur lief’. En meer dan vader wellicht ooit had durven dromen, zou Marcel volledig aan die opdracht voldoen.
Moeder Jozefine neemt dan het stokje van vader Jozef over. Het mag de jonge Marcel aan niets ontbreken en hij krijgt de beschikking over een waar laboratorium aan technische, fysische en chemische apparatuur, een microscoop, een timmerwerkplaats, een biljartkamer, een verzameling boeken, schelpen, postzegels en muziekinstrumenten, waaronder een harmonium. (Marcel speelt tegen die tijd overigens al voortreffelijk piano.) Niets wordt aan het toeval overgelaten om Marcel zo goed mogelijk in te voeren in de wereld van wetenschap, natuur en cultuur. Op lange vakanties maken moeder en zoon reizen door geheel Europa, waarop zij zich gezamenlijk voorbereiden met cursussen in Duits, Italiaans, Spaans, en drie Scandinavische talen. En uiteraard beheerst Marcel daarnaast ook het Frans, leert hij Grieks en Latijn en voegt daar later zelf nog Russisch aan toe.
Eenmaal op het atheneum in Gent – waarvoor hij later zal slagen als de beste leerling ooit – stort Marcel zich in de Vlaamse kwestie, die hem overigens van huis uit al zeer vertrouwd was. Daarin radicaliseert hij snel. In allerlei Vlaamse bewegingen speelt hij een hoofdrol, waarbij hij welbespraakt en vaak in retorisch taalgebruik, felle redevoeringen houdt en dito artikelen schrijft, onder meer over de eerdergenoemde ideologie.
Toch ziet hij daarnaast ook kans om op eenentwintigjarige leeftijd summa cum laude te promoveren in de biologie, op een onderzoek naar de invloed van zonlicht op

naaldbomen. (En later in Nederland zal hij in 1925 nogmaals cum laude promoveren in de astrofysica).



fig. 3 Minnaert in 1914 op een-entwintigjarige leeftijd, ten tijde van zijn promotie en Vlaams activisme

In 1915 gaat Minnaert naar Leiden om zich verder te bekwamen in de natuurkunde. Dit ter voorbereiding op een docentschap aan de Hoogeschool van Gent, die met behulp van de Duitsers zal worden vernederlandst. En daar in Leiden, in de kring rond de fysici Lorenz en Ehrenfest, neemt hij ook deel aan de didactische seminaria van mevrouw Ehrenfest-Afanasjeva, wat zijn belangstelling voor de vernieuwing van onderwijs en opvoeding definitief zal beïnvloeden. Haar onconventionele aanpak van het meetkundeonderwijs ervaart hij als een *aha-erlebnis*, die hem later de uitspraak zal ontlokken, dat 'een originele didactische vondst evenveel waard kan zijn als een wetenschappelijke ontdekking'.
In Leiden ontmoet Minnaert ook vrienden voor het leven als Struik, Burgers en Romein, wier fel socialistische overtuiging op dat moment aan Minnaert niet besteed is. Zijn radicale Vlaamse opstelling wordt weliswaar getolereerd, maar allerminst gebillijkt. En als dan blijkt dat Minnaert in Leiden ook nog docenten tracht te werven voor zijn Gentse Hoogeschool, is hij ten huize van de Ehrenfesten niet meer welkom.
Terug in Vlaanderen is Minnaert dan van 1916 tot 1918 docent natuurkunde aan die Hoogeschool van Gent, om daar, naast een moderne bibliotheek, ook onmiddellijk het natuurkundepracticum in te voeren.
Na de Duitse nederlaag wijken moeder en zoon uit naar Nederland, waar Minnaert zich in Utrecht meldt bij de astrofysicus prof. Julius. En daar komt hij als geroepen, omdat hij vanuit zijn theoretische en technische achtergrond bij uitstek geëquipeerd is om Julius' net ontwikkelde zonnetheorie te testen. Met zeer geavanceerde apparatuur doet Minnaert onderzoek naar de aard en intensiteit van Fraunhoferlijnen in het zonnespectrum (waarbij ik er maar van uitga dat u uit uw vroegere natuurkundelessen bekend bent met het feit dat die donkere lijnen in het zonnespectrum ontstaan door absorptie van licht door chemische elementen in de zonneatmosfeer).

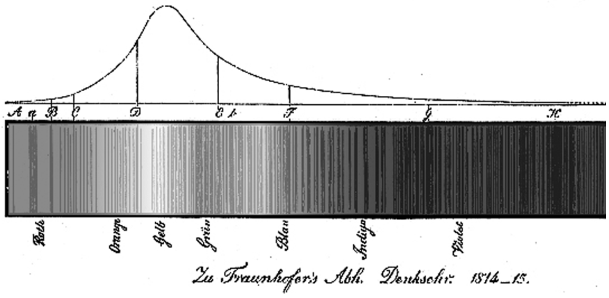


fig. 4 Zonnespectrum met Fraunhoferlijnen

Met veel vernuft en vindingrijkheid – het zou in dit tijdsbestek te ver voeren daarop in te gaan – weet Minnaert dan in de loop der jaren fundamentele problemen op te lossen rond de kwantificering en normering van die lijnintensiteiten, bepalend voor de chemische samenstelling van de zonneatmosfeer en per consequentie, voor de sterren.
Met behulp van zijn assistenten – hij is in 1926 tot lector benoemd – voltooit hij eind jaren dertig een titanenarbeid met de publicatie van een 'Atlas of the Solar Spectrum', later gevolgd door een 'Tabel' met gedetailleerde analyses van circa 23.000 Fraunhoferlijnen.
In 1937 wordt Minnaert tot hoogleraar astronomie benoemd en krijgt hij zijn eigen sterrenwacht en apparatuur in de 'Sonnenborg' te Utrecht. Zijn ster aan het internationaal astronomisch firmament is dan al naar het zenith gestegen en in de loop der tijden ontvangt hij de hoogste onderscheidingen en vele eredoctoraten.
Inmiddels is Minnaert in 1928 getrouwd met Miep Coelingh, een van zijn natuurkundestudentes. Het echtpaar krijgt twee zoons, Koen en Boudewijn, waarvan de oudste in 1963 op tragische wijze om het leven zal komen. In 1932 wordt Minnaert tot Nederlander genaturaliseerd, al zal hij zich al die jaren in Nederland ook blijven inzetten voor zijn ideaal van een zelfstandig Vlaanderen. Daarbij komt het echter in 1937 tot een breuk met zijn medeflaminganten. Op een herdenkingsbijeenkomst voor de Vlaamse dichter Renée de Clercq, keert hij zich demonstratief en met geheven vuist tegen het opkomend fascisme en de NSB, waartoe sommigen van zijn kornuiten zich voelen aangetrokken om hun doel te bereiken. (De ouderen onder ons zullen zich uit de oorlogstijd bijvoorbeeld nog de naam van Van Genegten herinneren).
In reactie daarop wordt Minnaert in de rechtse pers met zijn *'vuist van Moskou'*, als communist afgeschilderd.

Tijdens de Tweede Wereldoorlog werkt Minnaert stug door, al wordt hij van 1942 tot 1944 in St. Michielsgestel gegijzeld, omdat hij zich in een felle rede gekeerd heeft tegen het gedwongen ontslag van zijn joodse collega en vriend, de quantumfysicus Ornstein. Daar in St. Michielsgestel organiseert hij cursussen en houdt hij vele voordrachten over zeer uiteenlopende onderwerpen, onder meer uit zijn '*De natuurkunde van 't vrije veld*'.
Na de Tweede Wereldoorlog, bij de opkomende radioastronomie en het ruimteonderzoek, richt Minnaert zich in zijn wetenschappelijk werk voornamelijk op het fotometrisch onderzoek van het maanoppervlak, waarbij hij later het genoegen zal smaken dat een van de maan-kraters naar hem wordt vernoemd.
Daarnaast wijdt hij zich in vele hoedanigheden en functies aan de dienstverlenende relatie tussen wetenschap en samenleving. Zo is hij onder meer van 1947 tot 1951 voorzitter van het Verbond van Wetenschappelijk Onderzoekers. Daarbij drijven zijn geëngageerde humanistische en passivistische opvattingen over mens, samenleving en wereldvrede hem steeds verder in de linkse hoek van het politieke spectrum. Hij is bestuurslid van de Vereniging Nederland-USSR en actief in Wereldvredescongressen en de Nederlandse Vredesraad, die in die tijd als mantelorganisaties van het communisme werden gezien. Daarbij zal hij overigens – heel karakteristiek – niet schromen de CPN in haar gedragswijze fel te kritiseren.
Zonder zijn basisprincipe van wederkerig dienstbetoon te verloochenen, heeft Minnaert na de Tweede Wereldoorlog zijn nationaal Vlaams activisme kennelijk ingeruild voor een internationaal mondiaal passivisme.
Toch zal hij als stille getuige van zijn blijvende Vlaamse gezindheid in een omvangrijk project nog de uitgave verzorgen van het verzameld werk van zijn oud stad- en landgenoot Stevin. '*The Principal Works of Simon Stevin*' verschijnt tussen 1955 en 1966 in vier kloeke delen.
Minnaert overlijdt in 1970 en stelt zijn lichaam ter beschikking van de wetenschap.

Didactiek van het natuurkundeonderwijs
Wat in dit beknopte overzicht nog nauwelijks ter sprake kwam, is Minnaerts intense belangstelling voor de didactiek en methodiek van het natuurkundeonderwijs en de desbetreffende lerarenopleiding. Zo verschijnt in 1923 van zijn hand het boekje '*Natuurkunde in leerlingenproeven*', waarin hij geheel in overeenstemming met zijn jeugdervaring en onderwijskundige overtuiging van 'zien, doen en denken', de leerlingen in en buiten de klas verrassende experimenten laat doen met de meest eenvoudige en voor de hand liggende middelen als naalden, spijkers, kurken, kaarsen, spiegels, magneten, enzovoort. Zo laat hij de leerlingen bijvoorbeeld om het uur temperatuurmetingen doen van lucht en water – niet schromend zelf de nachtelijke waarnemingen voort te zetten – om uit de bijbehorende grafieken de essentiële conclusie te trekken dat water kennelijk moeilijker te verwarmen en te verkoelen is dan lucht.

In dit verband is het interessant de vier methodisch-didactische principes die Minnaert aan zijn '*Natuurkunde in leerlingenproeven*' ten grondslag legt, kort weer te geven:

1. Er dient een directe relatie gelegd te worden tussen het vakonderwijs en het dagelijks leven; buitenschoolse ervaringen zijn daarbij zowel uitgangspunt als eindpunt van het onderwijs.
2. Natuuronderwijs dient vroegtijdig te beginnen: kinderen houden van experimenteren en verzamelen zo een schat aan herinneringsmateriaal, waaruit ze later kunnen putten.
3. Bij het uitvoeren van proeven dienen leerlingen samen te werken. Dat stimuleert het wederkerig hulpbetoon en de klas wordt een eenheid die samen zoekt, werkt en besluit. Gelukkige vondsten van leerlingen komen aan alle anderen ten goede, evengoed als begane vergissingen.
4. Cognitieve vorming dient verbonden te zijn met affectieve en motorische vorming: het gaat niet alleen om hersenwerk, maar ook om het samenwerken bij het voorbereiden, inrichten en uitvoeren van proeven en het praten over waarnemingen met de partner en de klas. Het kind moet zelf rechtstreeks in aanraking komen met de natuur; het moet 'zijn' proef, 'zijn' ontdekking worden.

Herkent u iets in deze uitgangspunten?

Alle jaren nadien blijft Minnaert à la mevrouw Ehrenfest pleiten voor een meer praktische en experimentele inleiding in het natuurkundeonderwijs. En evenals mevrouw Ehrenfest brengt hem dat eind jaren twintig in aanvaring met de streng epistemische opvattingen van Dijksterhuis, als hij ervoor pleit het veraxiomatiseerde mechanicaonderwijs geheel bij de praktische natuurkunde onder te brengen. Maar vooralsnog boekt hij daarin geen succes.



fig. 5 'Een zonnige conferentiedag in Woudschoten 1951, met Minnaert op de stoel rechts voorin.'

Wel brengt hij zijn pleidooi voor een verbetering van de universitaire lerarenopleiding zelf in praktijk als hij Kohnstamm in 1930 opvolgt als privaatdocent. En subtiel

verlegt hij daarbij het primaat van de pedagogiek naar dat van de vakdidactiek, als hij Kohnstamms opdracht 'didactiek en *pedagogiek* van de natuurkunde' wijzigt in 'didactiek en *methodiek* van de natuurwetenschappen'. En zo slaagt hij er na de oorlog – cum suis – ook in aan de Universiteit van Utrecht een viertal vakdidactici aangesteld te krijgen voor de exacte vakken.

Daarnaast is hij medeoprichter van de werkgroep natuurkundedidactiek van de WVO, die evenals de wiskundewerkgroep hun jaarlijkse conferenties houden in Woudschoten.

Minnaerts voortdurend pleidooi voor een volwaardige plaats van het vak sterrenkunde in het voortgezet onderwijs – in plaats van het door hem verfoeide vak kosmografie – lijkt in dit verband welhaast een vanzelfsprekendheid, zoals hij desgevraagd ook nooit zal nalaten voordrachten te houden over de realiteit en schoonheid van zijn vakgebied: 'de wonderbouw van het heelal'.
Tot zover een beknopt en helaas onvolledig overzicht van Minnaerts boeiende levensloop.

2. *Minnaert meet*

Inderdaad, Minnaert meet
Ongetwijfeld mede onder invloed van mevrouw Ehrenfests ideeën, begint Minnaert kort na zijn Leidse periode alle natuurverschijnselen die hij op zijn pad ontmoet te onderzoeken en te noteren: licht, geluid, warmte en kou, regen en wind, zand en zee, rust en beweging. Alles wordt door hem aan een nauwgezette analyse onderworpen en van een verklaring voorzien.



fig. 6 De natuurkunde van 't vrije veld

En na twintig jaar van niet aflatende observaties en experimenten in de vrije natuur, leidt dat in 1937 tot publicatie van deel I van zijn '*De natuurkunde van 't vrije veld*': '*Licht en kleur in het landschap*', dat al spoedig in vele talen zal worden vertaald.
Vanaf 1939 volgen dan respectievelijk deel II: '*Geluid, warmte en electriciteit*', waarin Minnaert zich ook nog een bekwaam weerkundige toont en deel III: '*Rust en Beweging*', dat mede een impressie biedt van de wijze waarop hij zich zijn 'natuurlijk' mechanicaonderwijs had voorgesteld. En zoals eerder aangegeven, vereenzelvigt Minnaert zich als het ware met 'zijn' natuur, om ons in vaak verheven en poëtisch taalgebruik – en onder dichterlijke verwijzing – in te leiden in de schoonheid van haar verschijnselen, om ons dan vervolgens weer ernstig en rationeel de diepere achtergrond van die verschijnselen te verklaren.
Zo leidt hij bijvoorbeeld een paragraaf over het vliegtuig als volgt in:

> 'Een vliegtocht maakt een onvergetelijke indruk. O, het grootse vergezicht over de schone Aarde! O, de koninklijke weelde van de vliegdaad zelf, van het zweven, van het voorwaarts dringen in de ijle ruimte!'

Maar onmiddellijk daarna legt Minnaert ons nuchter uit, waarom een passagier toch rechtop kan blijven zitten als het vliegtuig een bocht maakt. De piloot zal die bocht immers zodanig uitvoeren, dat de resultante van middelpuntvliedende en zwaartekracht loodrecht op de cabinevloer blijft staan. Minnaert controleert dat met een schietlood, door zijn portemonnee aan een touwtje te hangen. Ook bevestigt hij een stuk elastiek aan die portemonnee, om uit de verkorting of verlenging van het elastiek af te leiden dat bij lichte turbulentie de verticale versnelling van het vliegtuig 2.20 m/sec^2 bedraagt, wat hem, naar zijn zeggen, 'plausibel voorkomt bij buiig weer'.
Aan het strand meet Minnaert om het uur de waterhoogte bij strandpalen met behulp van een decimaal verdeelde meetlat.

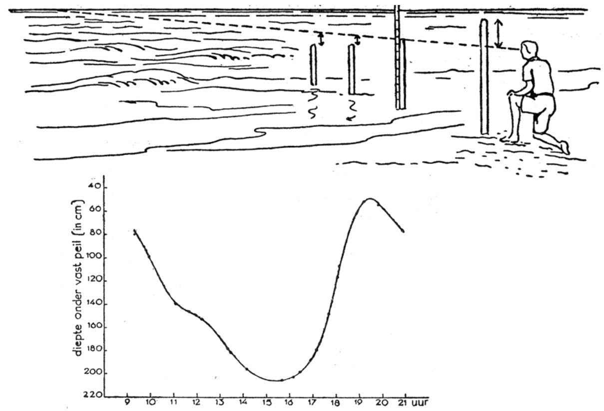


fig. 7 Waterhoogte, De natuurkunde van 't vrije veld , deel 3

Aan de hand van de daaruit voortvloeiende grafiek volgt dan een vrij gecompliceerde uiteenzetting over de aard en periodiciteit van de eb- en vloedbeweging.
Ook ziet hij kans om uit het verschil in tijdstip van zonsondergang op respectievelijk het vlakke strand en op een duintop – dat verrassend genoeg tot wel 50 seconden kan oplopen – bij benadering de aardstraal te berekenen. Overigens ligt daar dan wel weer heel wat natuur- en meetkundige kennis aan ten grondslag.
Maar daarnaast is nu juist een van de kenmerkende aspecten van *De natuurkunde van 't vrije veld* dat Minnaert, als in zijn *Natuurkunde in leerlingenproeven*, vrijwel uitsluitend gebruikmaakt van de meest eenvoudige meetinstru-

menten. Niet alleen geeft hij een keur aan natuurlijke en 'menselijke' maten voor bijvoorbeeld lengte- en hoekmeting, hij nodigt ons ook uit zelf eenvoudige apparatuur te maken, zoals onderstaand schietlood en een 'hark' voor hoekmeting.

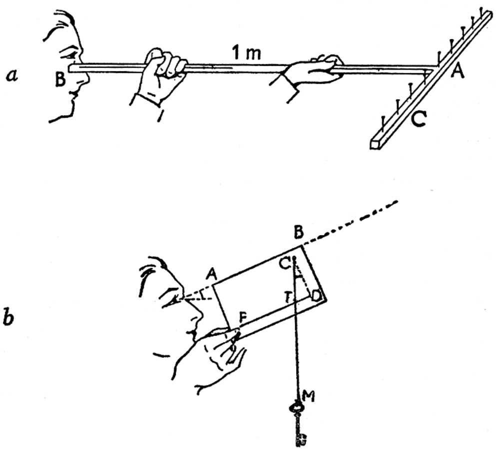


fig. 8 De ooghoek tussen twee spijkers op 7 cm afstand is 0,07 rad overeenkomend met ca. 4°. Uit: De natuurkunde van 't vrije veld, deel 3

Soms voert Minnaert zelfs een persoonlijke maat in. De mate van het fonkelen der sterren bijvoorbeeld, scoort hij naar eigen bevinden tussen 0 en 10. En hij voegt daaraan toe dat 'dergelijke voorlopige schalen veel nut hebben gehad in de natuurwetenschappen', omdat er vroeg of laat wel iemand komt die een middel vindt om die kwalitatieve schaal in een getalmaat om te zetten. Zijn eigen kwantificering van de intensiteit van Fraunhoferlijnen zal hem daarbij zeker door het hoofd hebben gespeeld.
Maar wellicht meer verrassend nog dan het hoe en wat Minnaert meet, is zijn niet aflatende opmerkzaamheid op alledaagse verschijnselen, waaraan de gemiddelde mens normaliter voorbijgaat. En dat geldt niet zozeer de vraag waarom de maan met ons 'meeloopt', waarom de lucht blauw en de zon geel is, waar iedereen wel eens over nagedacht zal hebben, maar wel de vraag waarom kaarslicht door het engelenhaar in de kerstboom zulke mooie lichtkringen vertoont, waarom een steen in het water gegooid een 'golfspectrum' veroorzaakt – grote golven lopen sneller dan kleine – hoe je in een trein uit het spoor van regendruppels op de ruit de valsnelheid van die regendruppels kunt bepalen, enzovoort, enzovoort.
Heeft u er bijvoorbeeld wel eens bij stilgestaan waarom een kind op een schommel juist díe bepaalde bewegingen maakt om de schommelsnelheid te doen toenemen? De vanzelfsprekendheid van die bewegingen, ook uit eigen ervaring, doet je daar kennelijk nauwelijks bij stilstaan. Zo niet voor Minnaert.

Aan de hand van een eenvoudig model waarin de verplaatsing van de zwaartekracht en het behoud van impulsmoment de bepalende factoren zijn, toont hij aan dat het kind instinctief precies op het goede moment de knëeen strekt en buigt, respectievelijk voor- en achterover gaat hangen. Maar zoals gezegd, het is lang niet altijd eenvoudige kost die Minnaert ons voorzet, zeker niet als hij bijvoorbeeld ook nog de arbeidswinst per schommelbeweging uitrekent, $3mgh(1-\cos\theta)$, waarvan het begrijpen vrij diepgaande achtergrondkennis vereist.

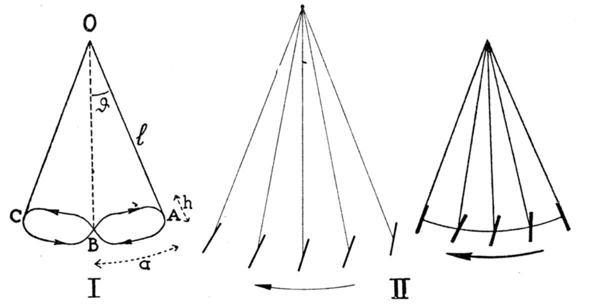


fig. 9 Twee manieren om een schommel in beweging te houden:
I: het zwaartepunt afwisselend hoger en lager brengen
II: het lichaam afwisselend naar voren en achter doen hellen
Uit: De natuurkunde van 't vrije veld, deel 3

De regenboog
Laat ik u tot besluit confronteren met het klassiek verschijnsel van de regenboog, door Minnaert geïntroduceerd met enkele dichtregels uit Jacques Perks *Iris*, de godin van de regenboog:

> … De goudene Iris lacht!
> En stil oversprei ik de vale vallei
> Met een gloed van zonnig smaragd.

En zelf voegt hij daar nog een sfeervolle passage aan toe over opkomende zwarte wolkenvelden, die de hemel overwelven en met geweld over ons heen trekken, met regen en felle donderslagen. Maar '(…) dan schittert weer de reeds lage zon. En in de bui die zich naar het oosten verwijdert, welft zich een rijkgekleurde, wijdgespannen regenboog'.
Natuurlijk, u kent de regenboog en u heeft die tweede regenboog ook wel eens gezien. Meer dan dat, u weet dat die regenboog tot stand komt door breking van het zonlicht in de regenbui. Maar met Minnaert heb ik dan nog een paar vragen voor u:
- Waarom bijvoorbeeld is die regenboog slechts een smalle boog; waarom zou de hele regensluier zich niet bont kleuren?
- Waarom is die regenboog slechts een deel van een cirkel – en ís het dat wel? – en niet een hele cirkel?
- Waarom ontstaat een regenboog alleen bij laagstaande zon?
- Is een regenboog altijd even breed en heeft hij altijd dezelfde kleurintensiteiten?
- Zijn de kleuren van de regenboog en zijn nevenboog naar elkaar toe, of juist van elkaar afgekeerd?
- Heeft u wel eens opgemerkt dat de lucht tussen die regenbogen donkerder is dan daarbuiten?
- Zou de maan ook een regenboog kunnen maken, enzovoort.



fig. 10 Een dubbele regenboog

Ik geef u een verklaring over het ontstaan van de regenboog, die aan Descartes is ontleend en die – het zij gezegd – door Minnaert wel erg summier wordt weergegeven. Enkele van de hierboven weergegeven vragen zijn dan verder uit die verklaring af te leiden. De rest kunt u opzoeken in *De natuurkunde van 't vrije veld*.

1. Vooreerst gaan we ervanuit, dat de lichtverdeling in de gehele regensluier is op te vatten als de som van de lichteffecten in de afzonderlijke regendruppels. We beschouwen dus eerst de lichteffecten in een afzonderlijke regendruppel.

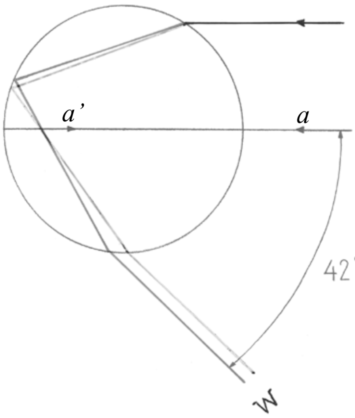


fig. 11 Stralengang in een druppel

Het zonlicht dat evenwijdig op die regendruppel invalt, wijkt af volgens de wetten van breking en terugkaatsing. Alleen een zonnestraal *a* door het middelpunt van de druppel zal na terugkaatsing onder een hoek van 180° ongebroken in zichzelf terugkeren (*a*'), of anders gezegd, onder een hoek van 0° in tegengestelde richting met de invallende straal. Alle andere invallende stralen zullen na breking en terugkaatsing de druppel verlaten in tegengestelde richting, onder een hoek die groter is dan 0° met de invallende straal. En onder al die uittredende stralen zal er één zijn die een grootste afwijkingshoek (in tegengestelde richting) vertoont met die invallende straal. Wellicht zou men nu verwachten dat dit de uittredende straal zal zijn van de zonnestraal die aan de top van de druppel intreedt (onder een hoek van 90°), waar hij de grootste breking ondergaat. Maar dit blijkt niet het geval te zijn.

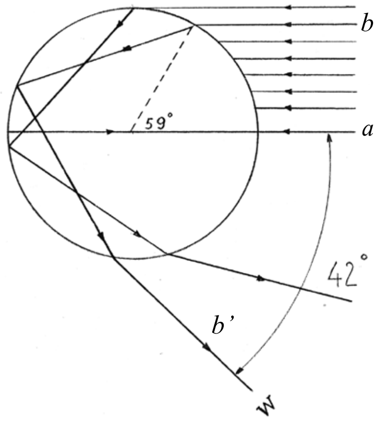


fig. 12 De grootste breking

Gegeven de brekingsindex van lucht naar water (4/3), en andersom, kan men namelijk berekenen dat een straal *b* die onder een hoek van 59° op de druppel invalt, na breking, terugkaatsing en nogmaals breking (*b*') een grootste afwijking krijgt van ca 42° (in tegengestelde richting) ten opzichte van de invallende straal.

Maar dat betekent dat stralen die vlak boven en vlak onder straal *b* invallen, gezamenlijk en vrijwel parallel, vlak onder straal *b*' zullen uittreden. Invallende stralen, die verder van *b* verwijderd zijn – onder en boven – zullen meer verspreid tussen *a* en *b*' uittreden.

Bij *b*' treedt dus een verdichting van uittredende stralen op met als gevolg een grotere lichtintensiteit dan elders tussen *b*' en *a*. En omdat de samenstellende kleuren van het invallend zonlicht alle een iets afwijkende brekingsindex vertonen – rood het kleinst, violet het grootst – zal er zich bij *b*' een kleurenvlek voordoen met rood boven en violet onder.

Alle kleurenvlekken nu van regendruppels uit de regenwolk tezamen vormen dan een regenboog, waarvan de stralen voor een waarnemer *W* een hoek van ca 42° maken met de invallende zonnestralen. Die regenboog is dus als het ware de grondcirkel van een kegel met de waarnemer als top en een tophoek van 42°.

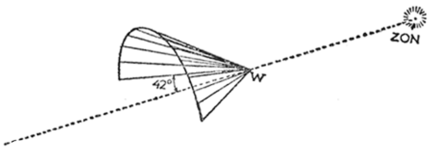


fig. 13 Regenboogkegel

En Minnaert zou Minnaert niet zijn als hij ons niet een middel aan de hand zou doen om die hoek van 42° ook daadwerkelijk te meten.

Met een speld of spijker wordt een correspondentiekaart aan een boom bevestigd. Eén kant van de kaart wordt nauwkeurig naar de top van de regenboog gericht, terwijl de schaduw van de speld of spijker de richting zon-waarnemer aangeeft. De hoek tussen deze schaduw en de bovenrand van de kaart is dan rechtstreeks af te lezen, waarbij

men zich overigens wel kan afvragen, als die meetapparatuur al voorhanden zou zijn, of de regenboog ons voldoende tijd gunt die meting ook daadwerkelijk te verrichten.

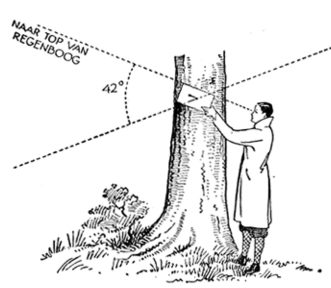


fig. 14 Het meten van de hoek. Uit: De natuurkunde van 't vrije veld, deel 1

Dat waarnemer *W* slechts een deel van die grondcirkel zal waarnemen, volgt uit het feit dat een groot gedeelte van die cirkel zich onder de horizon bevindt. In een vliegtuig bijvoorbeeld moet men in principe een volledige cirkelboog kunnen zien, en dat is ook wel gebeurd. Maar evengoed kan men op een zonnige zomerdag proberen met een fijnstralige tuinsproeier een vollediger boog tevoorschijn te toveren.
Merk ten slotte op dat waarnemer *W* de regenboog ziet met de rode kleur boven en het violet onder, terwijl alle andere uittredende stralen, die zich door grotere spreiding weer tot wit licht verenigd hebben, zich aan de violette onderkant van die regenboog bevinden (tussen *b*' en *a*). Onder die regenboog zal het dus helderder zijn dan daarboven. Op vergelijkbare wijze als hiervoor, kan men nu constateren, dat er een tweede, lichtzwakkere regenboog ontstaat door invallende stralen, die twee keer in de regendruppel worden teruggekaatst voor zij na (tweede) breking weer uittreden.

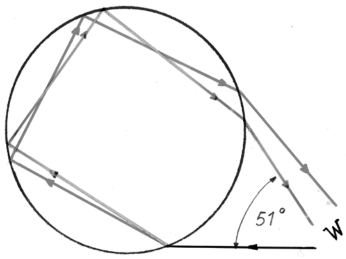


fig. 15 Stralengang van de tweede boog

De maximale intensiteit van uittredende stralen treedt nu op onder een hoek van 51° (in tegengestelde richting) met de invallende stralen, terwijl de kleurenvolgorde net andersom zal zijn: violet boven en rood onder. Ook de grootste helderheid van uittredende stralen zal zich nu juist aan de violette bovenkant van de boog voordoen.
Samengevat ziet waarnemer *W* dus een tweede, lichtzwakkere regenboog – intensiteitsverhouding 1:8 – op circa 9° boven de eerste, waarbij de rode kleuren van beide bogen naar elkaar zijn toegekeerd. Tussen beide bogen in zal het bovendien donkerder zijn dan aan de heldere weerskanten ervan (zie figuur 16).

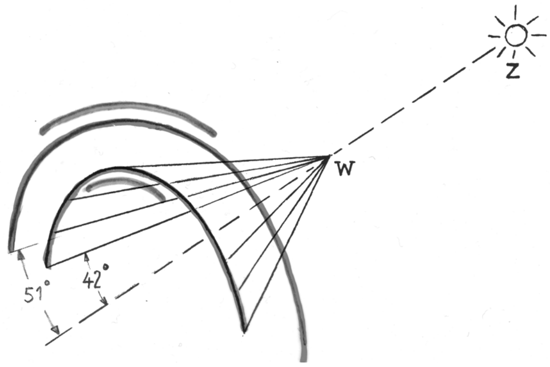


fig. 16 Regenboogkegels van eerste en tweede regenboog

Over de regenboog zouden nog veel meer interessante verschijnselen te vertellen zijn, zoals bijvoorbeeld over de polarisatie van het regenbooglicht, over het optreden van zogenaamde overtallige bogen – een interferentieverschijnsel – over regenbogen in bedauwde grasvelden, enzovoort, maar voor dit moment laten we het hierbij.

Overwegingen

Ik wil graag eindigen met een enkele persoonlijke overweging.

Zoals eerder gesteld, bevat *De natuurkunde van 't vrije veld* lang niet altijd eenvoudige kost en wordt er nog al eens een beroep gedaan op natuurkundige achtergrondkennis. Anderzijds bevatten de drie delen zoveel mooie en verrassende observaties, dat men zich kan afvragen of er niet aanleiding zou zijn een gepopulariseerde versie samen te stellen, die een groter publiek kan bereiken. Tezamen wellicht met een pendant als 'Wiskunde te velde' …?

Wij hervormers van het wiskundeonderwijs uit de jaren zeventig hebben ons wel eens verbeeld dat wij de uitvinders zijn van 'realistisch' onderwijs, met kernbegrippen als 'wiskunde als menselijke activiteit', 'wiskundige wereldoriëntatie' en het 'mathematiseringsproces'.
Wie echter kennisneemt van de didactische activiteiten van prof. Minnaert zal die mening moeten herzien. Hij was ons ver vooruit met zijn benadering van 'realistisch natuurkundeonderwijs'. Ook bij hem gaat het om natuurkunde als menselijke activiteit, om natuurkundige wereldoriëntatie en – ik zeg het bewust – het fysiseringsproces als kern van zijn onderwijsbenadering.
Natuurlijk, *inhoudelijk* bestaan er fundamentele verschillen tussen realistisch wiskunde- en natuurkundeonderwijs: natuurkunde ligt binnen de ons omringende wereld – en zeker bij Minnaert – welhaast voor het op*rapen*, terwijl je wiskunde daaruit veeleer moet op*roepen*.
Maar zoals we hiervoor constateerden, in de *onderwijskundige* benadering van beide disciplines liggen wel degelijk belangrijke parallellen: beide vinden hun aangrij-

pingspunt in de werkelijkheid; en beide beschouwen die vanuit een specifiek mathematische, respectievelijk natuurkundige bril, om die werkelijkheid dan via modelvorming en technische bewerking met hun oplossing weer te verrijken.
Laat ik in het verlengde van die constatering een – althans voor mij – intrigerende vraag stellen: bestaan er naast *mathematisering* en *fysisering*, ook bij andere onderwijsvakgebieden dergelijke '-iserings'-processen met vergelijkbare doelstelling en benaderingswijzen? Prof. Van Dantzig, die ik hier bij een eerdere gelegenheid ten tonele mocht voeren, sprak over mathematiseren wel als 'een algemeen ordenende activiteit van de werkelijkheid'.

Parallel daaraan luidt mijn vraag dus: is χ-iseren, waarbij de χ staat voor enig onderwijsvakgebied, wellicht ook een 'algemeen ordenende activiteit voor realistisch onderwijs'?
Zoals gesteld, het is maar een vraag …

Ik dank u wel.

Edu Wijdeveld, Baarn
